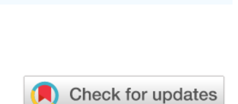
МАШИНОСТРОЕНИЕ







Научная статья
УДК 621.873.2:656.081
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-42-50

Повышение безопасности эксплуатации мостовых кранов со сварной модульной конструкцией на основе анализа их аварий

А. А. Короткий[1] ✉, **А. Н. Павленко**[1], **Э. А. Панфилова**[1], **Д. Н. Симонов**[2]
[1]Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ООО Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ (г. Новочеркасск, Российская Федерация)
✉ korot@novoch.ru

Аннотация
Введение. Представлен анализ разрушений сварных швов, возникших при эксплуатации мостовых кранов модульной конструкции. Предложены меры, позволяющие в дальнейшем предотвратить появление подобных дефектов, снизить вероятность аварий и повысить безопасность эксплуатации мостовых кранов со сварной модульной конструкцией. Актуальность работы обусловлена тем, что в РФ приблизительно 65 % зарегистрированных в Ростехнадзоре грузоподъемных кранов отработали нормативный срок службы.
Целью работы является повышение безопасности эксплуатации мостовых кранов модульных конструкций и надежности их сварных металлоконструкций. Реализуя цели работы, на основе анализа разрушений металлических конструкций мостовых кранов, составлена диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана. Применение предлагаемой диагностической карты в производственных условиях позволит существенно поднять качество диагностики сварных соединений.
Материалы и методы. Выполнены исследования аварий несущих металлических конструкций кранов методами технической диагностики разрушений сварных швов, возникших при эксплуатации мостовых кранов модульной конструкции. Это позволило разработать ряд мер по предотвращению аварий мостовых кранов, инициированных разрушением их сварных модульных конструкций.
Результаты исследования. На основе проведенного анализа аварий составлена диагностическая карта разрушающихся сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана. Использование предлагаемой диагностической карты позволит повысить надежность сварных металлоконструкций и улучшить качество диагностики сварных соединений в производственных условиях.
Обсуждение и заключения. В результате проведенного анализа разрушений конструкций модульных мостовых кранов сформулирован ряд мер, позволяющих предотвратить образование подобных дефектов, возникновение из-за них аварий, повысить безопасность эксплуатации мостовых кранов.

Ключевые слова: мостовой грузоподъемный кран со сварной модульной конструкцией, безопасность, авария.

Для цитирования. Повышение безопасности эксплуатации мостовых кранов со сварной модульной конструкцией на основе анализа их аварий / А. А. Короткий, А. Н. Павленко, Э. А. Панфилова, Д. Н. Симонов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 4. — С. 42–50. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-42-50

Original article

Improving the Safety of Operation of Overhead Cranes with Welded Modular Construction Based on the Analysis of Their Accidents

Anatoliy A. Korotkiy[1] ✉, Andrey N. Pavlenko[1], Elvira A. Panfilova[1], Dmitriy N. Simonov[2]

[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

[2] LLC Engineering and Consulting Center «Thought» NSTU (Novocherkassk, Russian Federation)

✉ korot@novoch.ru

Abstract

Introduction. The article presents an analysis of the destruction of welds that occurred during the operation of modular overhead cranes. Measures are proposed to prevent the occurrence of such defects in the future, reduce the likelihood of accidents and improve the safety of operation of overhead cranes with a welded modular construction. The relevance of the work is due to the fact that in the Russian Federation approximately 65% of the lifting cranes registered with Rostechnadzor have fulfilled the standard service life.

The work objective is to improve the safety of operation of modular overhead cranes and the reliability of their welded metal structures. Achieving the objectives of the work, based on the analysis of the destruction of metal structures of overhead cranes, a diagnostic map of welded joints of metal structures of end beams with modules of travelling wheels of overhead cranes was compiled. The use of the proposed diagnostic card in a production environment will significantly improve the quality of diagnostics of welded joints.

Materials and Methods. Investigations of accidents of load-bearing metal structures of cranes by methods of technical diagnostics of destruction of welds that occurred during the operation of overhead cranes of modular design have been carried out. This made it possible to develop a number of measures to prevent accidents of overhead cranes initiated by the destruction of their welded modular structures.

Results. Based on the analysis of accidents, a diagnostic map of destructing welded joints of metal structures of end beams with modules of travelling wheels of an overhead crane has been compiled. The use of the proposed diagnostic card will increase the reliability of welded metal structures and improve the quality of diagnostics of welded joints in production conditions.

Discussion and Conclusions. As a result of the analysis of structural failures of modular overhead cranes, a number of measures are proposed to prevent the formation of such defects, the occurrence of accidents due to them, and to improve the safety of operation of overhead cranes.

Keywords: overhead lifting crane with welded modular construction, safety, accident.

For citation. Korotkiy A. A., Pavlenko A. N., Panfilova E. A., Simonov D. N. Improving the Safety of Operation of Overhead Cranes with Welded Modular Construction Based on the Analysis of Their Accidents. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 42−50. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-42-50

Введение. В настоящее время в Российской Федерации получили широкое распространение мостовые грузоподъемные краны со сварной модульной конструкцией. Они массово применяются при выполнении технологических процессов на различных производственных предприятиях, что определяет степень механизации погрузо-разгрузочных работ, влияет на затраты выпускаемой продукции и иные технико-экономические показатели производства.

На текущий момент в Российской Федерации приблизительно 65 % зарегистрированных в Ростехнадзоре грузоподъемных кранов отработали нормативный срок службы [1]. Эксплуатация мостовых кранов, выработавших свой срок службы, зачастую сопровождается авариями с сопутствующими случаями производственного травматизма и значительного материального ущерба. В соответствии с ФЗ № 116[1] к категории опасных производственных объектов относятся объекты, на которых используются краны, а ФНП[2], регламентирует проведение экспертизы промышленной безопасности кранов.

[1] Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (редакция от 11 июня 2021 года) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» // consultant.ru : [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234 (дата обращения : 03.08.2022).

[2] Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» // sudact.ru : [сайт]. URL: https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-26112020-n-461-ob/federalnye-normy-i-pravila-v/ (дата обращения : 03.08.2022).

С введением Технических регламентов ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования»[3], ТР ТС 011/2011 «Безопасность лифтов»[4], ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств»[5] термин «безопасность грузоподъемного крана» можно рассматривать как «конструкционную безопасность» на всех стадиях жизненного цикла: проектирования, изготовления и эксплуатации. Нарушение конструкционной безопасности может привести к аварии подъемного сооружения. Вопросы обеспечения прочности крановых металлоконструкций рассмотрены в трудах [2–6], а с позиций безопасности крана как сложной технической системы в работе [7].

Целью настоящего исследования является повышение безопасности эксплуатации мостовых кранов модульных конструкций и надежности их сварных металлоконструкций. На основе анализа разрушений металлических конструкций мостовых кранов составлена диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана. Применение предлагаемой диагностической карты в производственных условиях позволит существенно поднять качество диагностики сварных соединений.

Материалы и методы. Анализ эксплуатации мостовых кранов методами технической диагностики [8] показывает, что в последние годы на таких кранах многократно происходили аварии, инициированные разрушением их сварных модульных конструкций. Причем подобного рода аварии происходили на мостовых кранах со сварной модульной конструкцией, которые проработали менее четверти указанного предприятием-изготовителем срока службы[6]. Проанализируем причины аварий мостовых кранов со сварной модульной конструкцией. Анализ разрушений конструкций модульных мостовых кранов позволит предложить ряд мер, позволяющих предотвратить образование подобных дефектов, возникновение из-за них аварий, а также повысить безопасность эксплуатации мостовых кранов.

Результаты исследования. Сроки службы грузоподъемных машин регламентированы государственными стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами. Каждый кран имеет определенный срок службы, указанный в его техническом паспорте. Как правило, срок службы крана определяется сроком службы его несущих металлических конструкций.

Например, требования надежности по ГОСТ 27584-88[7] устанавливают параметры для мостовых кранов, размещенных в помещении, не менее значений, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Показатель срок службы и надежности для мостовых кранов

Показатель срок службы и надежности для мостовых кранов	Норма для групп режима			
	1К, 2К	3К	4К, 5К	6К, 7К
Срок службы, лет, не менее	30	25	25	20
Наработка на отказ, циклы, не менее	11000			
Установленная безотказная наработка, циклы, не менее	32000		40000	64000
Установленный ресурс до капитального ремонта, циклы, не менее	30000	150000	190000	230000

Так, для крана группы режима 6К, 7К при 1,5 сменной работе в сутки и количестве циклов 5 в час, установленная безотказная наработка на отказ составит 64000/300×12×5=3,5 года.

Несущая металлическая конструкция двухбалочного мостового крана, представленная на рис. 1, состоит из двух пролетных балок, по которым перемещается грузовая тележка с механизмом подъема, и двух концевых балок, с установленной на них ходовой частью крана.

[3] ТР ТС 010/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности машин и оборудования» // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/902307904 (дата обращения : 10.08.2022).
[4] ТР ТС 011/2011 Технический регламент Таможенного союза «Безопасность лифтов» // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/902307835 (дата обращения : 11.08.2022).
[5] ТР ТС 018/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности колесных транспортных средств» // sudact.ru : [сайт]. URL: https://sudact.ru/law/reshenie-komissii-tamozhennogo-soiuza-ot-09122011-n_19/tr-ts-0182011/ (дата обращения : 11.08.2022).
[6] ГОСТ 33709.1-2015 Краны грузоподъемные. Словарь. Часть 1. Общие положения // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200135709?marker=7D20K3 (дата обращения : 13.08.2022).
[7] ГОСТ 27584-88 Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200004626 (дата обращения : 19.08.2022).

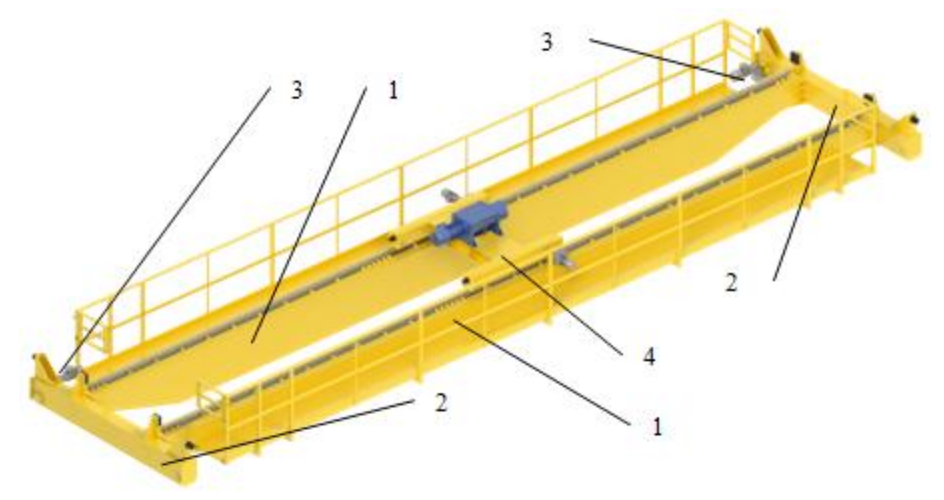


Рис. 1. Общий вид металлоконструкции двухбалочного мостового крана: 1 — пролетные балки; 2 — концевые балки; 3 — ходовая часть крана; 4 — грузовая тележка

Типовая металлическая конструкция концевой балки двухбалочного мостового крана, показанная на рис. 2, состоит из поясов (верхнего и нижнего), вертикальных стенок и диафрагм, размещенных внутри балки. Как правило, вертикальные стенки балок выполняются из цельного листа.

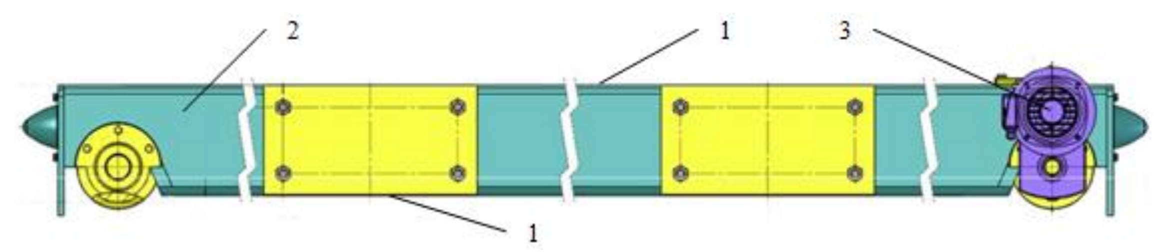


Рис. 2. Общий вид типовой металлоконструкции концевой балки двухбалочного мостового крана: 1 — верхний и нижний пояс; 2 — вертикальные стенки; 3 — ходовая часть крана

Для установки ходовой части двухбалочного мостового крана к концевым балкам, продемонстрированным на рис. 3, крепятся буксы с ходовыми колесами.



Рис. 3. Крепление букс с ходовыми колесами к концевым балкам двухбалочного мостового крана (фото авторов)

В последнее время получили широкое распространение модульные конструкции концевых балок, имеющие болтовые (рис. 4) или сварные (рис. 5) фланцевые соединения.

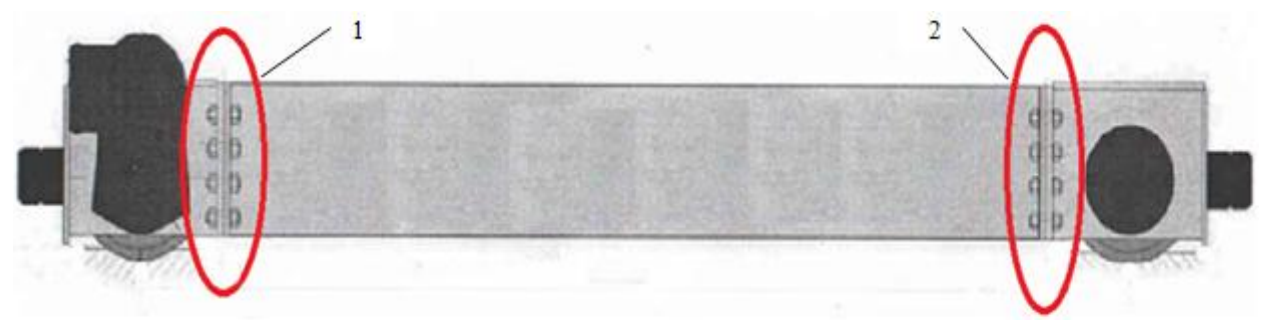


Рис. 4. Модульная конструкция концевой балки с болтовым фланцевым соединением: 1 — фланцевое соединение модуля приводного колеса; 2 — фланцевое соединение модуля холостого колеса

Модульная конструкция позволяет уменьшить габариты концевых балок крана при его транспортировке до места монтажа, но требует более высокой квалификации специалистов, производящих установку крана в производственных условиях, особенно модульной конструкции со сварным фланцевым соединением.

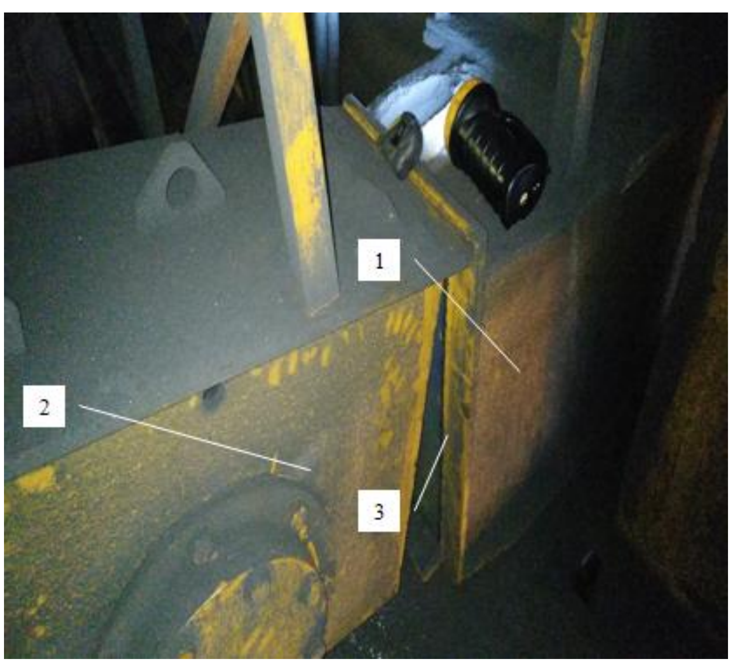
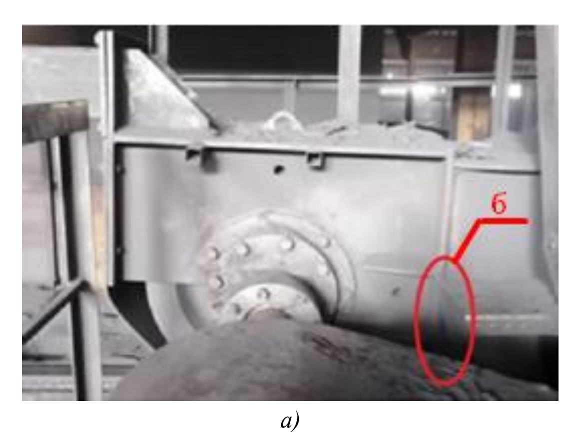
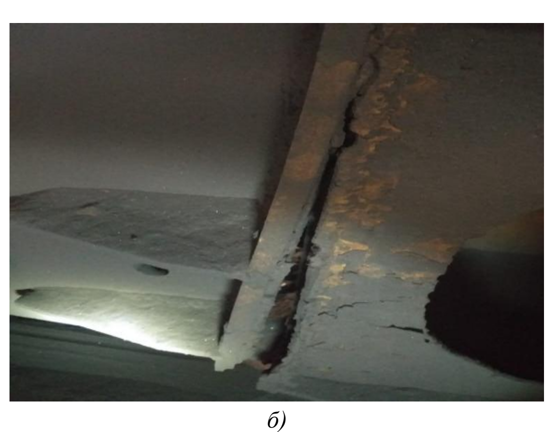


Рис. 5. Модульная конструкция концевой балки со сварным фланцевым соединением:
1 — металлоконструкция концевой балки; 2 — модуль ходового колеса; 3 — разрушенное сварное фланцевое соединение (фото авторов)

Наличие фланцевого соединения усложняет конструкцию концевой балки. На практике имеют место аварии мостовых кранов, вызванные разрушением сварного фланцевого соединения, представленного на рис. 6, модуля ходового колеса, как приводного, так и холостого, с концевой балкой.



а)



б)

Рис. 6. Разрушение сварного соединения модуля приводного колеса с концевой балкой:
а — модуль приводного колеса; *б* — разрушение сварного фланцевого соединения (фото авторов)

Анализ причин разрушений сварных швов фланцевых соединений, проиллюстрированных на рис. 7, модульных конструкций мостовых кранов позволяет предотвратить в дальнейшем появление подобных дефектов, повысить надежность сварных металлоконструкций, отработать методы диагностики сварных соединений в производственных условиях.

По результатам обследования с применением методов неразрушающего контроля [9– 17] составлена диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана грузоподъемностью 10 тонн, приведенная в таблице 2.

Таблица 2

Диагностическая карта сварных соединений металлоконструкций концевых балок с модулями ходовых колес мостового крана грузоподъемностью 10 тонн

Параметр	Обозначение	Фактическое значение	Рекомендуемое значение
Конструкция сварного соединения		Т1 по ГОСТ 14771-76[8] – односторонний без разделки кромки с конструктивным непроваром	Т6 по ГОСТ 14771-76 – с разделкой кромки
Толщина свариваемого металла, мм	S	10	10
Катет шва, мм	К	К = 0,4s + 2 = 6	10 – 12
Зазор между свариваемым металлом, мм	Z	≈ 0	0 – 1,5
Глубина проплавления, мм	H	≈ 0	1,5 – 2
Расчетная высота углового шва, мм	P	4,2	9
Расчетная площадь поперечного сечения шва, мм^2	F	18 – 20	50 – 70
Коэффициент формы шва	$K_ф$	1,5	1,8
Расчетная несущая способность по металлу шва, кН/см^2	$\frac{N}{\beta_f k_f l_w R_{wf} \gamma_c} \le 1$	Расчетная несущая способность 45% от проектной	Расчетная несущая способность 100% от проектной

[8] ГОСТ 14771-76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200004932 (дата обращения : 25.08.2022).

Узел соединения модуля ходового колеса следует отнести к тяжелонагруженной конструкции, которая воспринимает нагрузки от собственного веса крана, зависит от положения грузовой тележки в пролете крана и веса поднимаемого груза, воспринимает динамические нагрузки от состояния кранового пути. Коэффициент толчков при движении крана достигает значения К=1,3–1,4, а горизонтальная составляющая давления колеса R=0,5N, что следует учитывать при расчете прочности и долговечности конструкции.



а)



б)

Рис. 7. Разрушенный сварной шов соединения боковой стенки концевой балки с фланцем модуля ходового: *а* — глубина проплавления разрушенного сварного шва близка к нулю; *б* — стенка концевой балки с разрушенным сварным швом колеса (фото авторов)

Обсуждение и заключения. Представленное выше исследование, в аспекте повышения безопасности эксплуатации модульных мостовых кранов и надежности их сварных металлоконструкций, показывает, что:

1. Конструктивная безопасность модульной концевой балки снижена на стадии проектирования путем введения дополнительного сварного фланцевого соединения. Традиционная конструкция в виде неразрезной балки более надежна в эксплуатации и имеет больший ресурс.

2. На стадии изготовления концевой балки, вследствие неотработанного технологического процесса параметров сварки, ее конструктивная безопасность снижена до 45% требуемой несущей способности, что и привело в дальнейшем к полному разрушению сварного соединения.

3. Односторонние угловые швы в тавровых соединениях элементов металлоконструкций следует применять в конструкциях нормального и пониженного уровня ответственности по классификации ГОСТ 27751–2014[9]. Их не следует применять в узлах, испытывающих динамические нагрузки.

4. Назначение катета углового сварного шва в зависимости от толщины по формуле К=0,4s+2 приемлемо для сварных соединений изделий общего машиностроения. Для узлов крановых металлоконструкций, воспринимающих динамические нагрузки, катет сварного шва нужно назначать с учетом всех возможных сочетаний нагрузок.

5. Значение коэффициента прочности сварного шва φ определяется способом сварки и конструкцией шва, что снижает его несущую способность. Например, для таврового шва Т1 с конструктивным непроваром φ=0,65, для сварного шва Т6 с полной проваркой φ=0,9–1,0.

6. Диагностика сварных соединений с применением визуального и измерительного контроля позволяет определить только поверхностные дефекты, геометрические параметры сварного шва и их отклонения. Толщину сварного шва и величину конструктивного непровара возможно определить ультразвуковым методом контроля с использованием прямого или наклонного преобразователей.

[9] ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения // docs.cntd.ru : [сайт]. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200115736 (дата обращения : 03.09.2022).

Список литературы

1. Вопросы безопасности соединений конструкций грузоподъемных кранов / А. А. Короткий, А. Н. Павленко, Э. А. Панфилова, Д. Н. Симонов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 1. — С. 41–47. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-1-41-47

2. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / В. В. Москвичев, Н. А. Махутов, Ю. И. Шокин [и др.]. — Новосибирск : Наука, 2021. — 795 с.

3. Махутов, Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н. А. Махутов. — Новосибирск : Наука, 2008. — 522 с.

4. Лепихин, А. М. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем / А. М. Лепихин, В. В. Москвичев, С. В. Доронин // Вычислительные технологии. — 2009. — Т. 14, № 6. — С. 58–71.

5. Doronin, S. V. Erratum to: Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements / S. V. Doronin, E. M. Reizmunt, A. N. Rogalev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2018. — Vol. 47, № 4. — P. 387–387. https://doi.org/10.3103/S1052618818040167

6. Doronin, S. V. Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements / S. V. Doronin, E. M. Reizmunt, A. N. Rogalev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2017. — Vol. 46, № 4. — P. 364–369. https://doi.org/10.3103/S1052618817040069

7. Диагностика и риск-анализ металлических конструкций грузоподъемных кранов / В. С. Котельников, А. А. Короткий, А. Н. Павленко, И. И. Еремин. М-во образования и науки Рос. Федерации, Южно-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т). — Новочеркасск : Учебно-производственный центр «Набла» Южно-Российского государственного технического университета (НПИ), 2006. — 315 с.

8. Лепихин, А. М. Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования / А. М. Лепихин // Вопросы материаловедения. — 2007. — № 3 (51). — С. 208–213.

9. Doronin, S. Numerical approach and expert estimations of multi-criteria optimization of precision constructions / S. Doronin, A. Rogalev // CEUR Workshop Proceedings. — 2018. — Vol. 2098. — P. 323–337.

10. Махутов, Н. А. Безопасность и риски: системные исследования и разработки / Н. А. Махутов. — Новосибирск : Наука, 2017. — 724 с.

11. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. — 2-е изд. — Москва : URSS : ЛЕНАНД, 2018. — 238 с.

12. Клюев, В. В. Диагностика деталей машин и механизмов : в 2 ч. Ч. 1 / В. В. Клюев, В. Н. Лозовский, В. П. Савилов; под общ. ред. В. В. Клюева. — Москва : Спектр, 2017. — 176 с.

13. Неразрушающий контроль: справочник : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1: Ф. Р. Соснин. Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2: Ф. Р. Соснин. Радиационный контроль. — 2-е изд., испр. — Москва : Машиностроение, 2008. — 560 с.

14. Лепихин, А. М. Риск-анализ многокомпонентных систем с многоочаговыми повреждениями / А. М. Лепихин // Тяжелое машиностроение. — 2009. — № 6. — С. 23–24.

15. Махутов, Н. А. Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин / Н. А. Махутов, А. Ю. Албагачиев, С. И. Алексеева. — Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. — 574 с.

16. Probabilistic modeling of safe crack growth and estimation of the durability of structures / A. M. Lepikhin, V. V. Moskvichev, S. V. Doronin, N. A. Makhutov // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. — 2000. — Vol. 23, № 5. — P. 395–401. https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00303.x

17. Дусье, В. Е. Расчет и проектирование металлических конструкций мостовых кранов: учебное пособие / В. Е. Дусье, Ю. В. Наварский, В. П. Жегульский. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. — 133 с.

Поступила в редакцию 25.09.2022
Поступила после рецензирования 11.10.2022
Принята к публикации 11.10.2022

Об авторах:

Короткий Анатолий Аркадьевич, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, korot@novoch.ru

Павленко Андрей Николаевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, anpavlenko@rambler.ru

Панфилова Эльвира Анатольевна, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат философских наук, доцент, ScopusID, ORCID, kotorkaya_elvira@mail.ru

Симонов Дмитрий Николаевич, главный конструктор ООО Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ (346428, РФ, г. Новочеркасск, ул. Троицкая, 88), ORCID, simonov@ikc-mysl.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. А. Короткий — научное руководство, анализ результатов исследования, корректировка результатов исследования. А. Н. Павленко — формирование основной концепции, цели и результатов исследования, подготовка текста. Э. А. Панфилова — доработка текста, подготовка результатов исследования. Д. Н. Симонов — проведение неразрушающего контроля, расчетов, формирование результатов исследования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.